

MODELOWANIE I MONITORING W NAUKACH ROLNICZYCH

R.T. Walczak, C. Sławiński

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

S t r e s z c z e n i e. W pracy przedstawiono przykłady badań modelowych oraz systemów monitorowania środowiska przyrodniczego wykorzystywanych w naukach rolniczych. Podane przykłady miały na celu wykazanie, że zarówno badania modelowe jak też systemy monitorowania mają charakter uniwersalny, tzn. dotyczą wszystkich dyscyplin mieszczących się w zakresie nauk przyrodniczych oraz stanowią nowoczesny i skuteczny warsztat badawczy. Należy również podkreślić, że obie te metody wzajemnie się uzupełniają.

S ł o w a k l u c z o w e: modelowanie, monitoring, nauki rolnicze.

WSTĘP

“Fizyka jest nauką przyrodniczą najbardziej podstawową i wszechogarniającą, wpływ zaś jej na rozwój innych nauk przyrodniczych był i jest ogromny. Właściwie fizyka odgrywa dziś rolę tego, co dawniej nazywano filozofią przyrody i z czego zrodziły się współczesne nauki przyrodnicze. Specjaliści z różnych dziedzin uczą się fizyki ze względu na zasadniczą rolę jaką odgrywa ona w zrozumieniu wszystkich zjawisk” [19].

Laureat nagrody Nobla w dziedzinie fizyki R.P. Feynman stwierdza, że fizyka jest dziedziną nauki wspomagającą wiele innych dziedzin, a w praktyce prawie wszystkie nauki przyrodnicze. Przykładem takich interdyscyplinarnych dziedzin, w których wykorzystuje się metody fizyki są: biofizyka, geofizyka, astrofizyka, fizyka medyczna oraz agrofizyka.

W agrofizyce, jak w większości nauk przyrodniczych, zasadniczymi metodami badawczymi są modelowanie i monitoring.

MODELOWANIE

Badania modelowe polegają na tym, że nie jest badany proces lub obiekt w jego naturalnych warunkach, a obiekt lub proces łatwiejszy do badań, który

posiada cechy dostatecznie zbliżone do badanego procesu lub obiektu. Badania modelowe stosujemy wtedy, gdy:

- badany obiekt jest zbyt mały lub zbyt duży,
- badany proces jest zbyt szybki lub zbyt powolny,
- niemożliwa jest realizacja badań ze względów technicznych lub ekonomicznych.

Największą zaletą badań modelowych jest to, że modele można realizować jako modele materialne, jak również statystyczne [15] i matematyczno-fizyczne, które umożliwiają zarówno badanie obiektów i procesów, jak również ich symulację oraz przewidywanie zachowania się obiektów i procesów w założonych warunkach.

Modele można podzielić na:

- modele rzeczywiste,
- modele analogowe,
- modele fenomenologiczne,
- modele matematyczno-fizyczne.

Modele rzeczywiste to badania w kontrolowanych warunkach i badania w skali. Kontrolowane warunki i doświadczenia w skali realizowane są, np. w badaniach wazonowych, lizymetrycznych, rizotronowych i mikropoletkowych. Problem skali występuje, np. w badaniach właściwości mechanicznych ośrodków granulanych, a konkretnie przy określaniu kąta tarcia wewnętrznego i spójności, a także odkształceń objętościowych i wytrzymałościowych w aparacie trójosiowego ściskania. Należy pamiętać też o problemie wielkości badanego obiektu, tzn. aby był on na tyle duży, aby można było stosować mechanikę ośrodków ciągłych. Przykładem takich rozwiązań są komory o różnych rozmiarach w aparacie trójosiowego ściskania (dla gleby, ośrodków ziarnistych o różnych wymiarach ziaren). W badaniach modelowych wykorzystywane są również analogie pomiędzy zachowaniem się różnych obiektów lub przebiegiem różnych procesów. Przykładem może być analogia procesu przepływu prądu elektrycznego do analogicznego procesu przepływu masy w ciele kapilarno-koloidalno-porowatym. Tak więc badany proces czy zjawisko hydrofizyczne można opisać odpowiednim analogiem procesu czy zjawiska elektrycznego, i tak np:

- pojemności elektrycznej – odpowiada retencja wody,
- oporowi elektrycznemu – odpowiada opór przepływu,
- potencjałowi elektrycznemu – odpowiada potencjał wody.

Przykładem zastosowania **modeli analogowych** jest model elastoplastyczny, za pomocą którego można badać rozkład naprężeń w ciałach o jednorodnej gęstości,

co jest szczególnie ważne w badaniach sił mechanicznych materiałów roślinnych o budowie tkankowej.

W Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie opracowane zostało urządzenie, które jest modelem analogowym do badania mikrodyfuzji tlenu do korzenia roślin w glebie w różnych warunkach wilgotnościowych [8]. Analogiem korzenia rośliny, jako konsumenta tlenu (ujemne źródło) jest platynowa elektroda o potencjale -0.65 V względem kalomelowej elektrody odniesienia, przy którym zachodzi jonizacja tlenu. Mikrodyfuzja tlenu dąży do wyrównania koncentracji, a prąd jest miarą ilości jonizacji w jednostce czasu zachodzących na powierzchni elektrody platynowej. W ten sposób, wymuszając wydatek dyfuzji tlenu ODR, można określić warunki dostarczania tlenu do korzeni roślin w funkcji uwilgotnienia i wyznaczyć dla danej gleby wilgotność, przy której może wystąpić stres tlenowy. Aktualnie coraz rzadziej stosuje się modele analogowe na rzecz modeli fizyczno-matematycznych realizowanych numerycznie.

Modele fenomenologiczne konstruuje się w przypadku, kiedy rzeczywisty proces lub zjawisko jest na tyle złożone, że opisanie wszystkich mechanizmów mających wpływ na ich przebieg jest trudne lub wręcz niemożliwe. Korzysta się wtedy z równań empirycznych, gdzie współczynniki określane są na drodze eksperymentalnej. Zazwyczaj modele takie wchodzi w skład modeli mieszanych np. teoretyczno – fenomenologicznych. Przykładem takiego modelu jest model przewidywania plonów. Model taki zawiera wiele składowych symulujących różne procesy zachodzące w systemie gleba-roślina-atmosfera, zawiera także czynniki empiryczne określane na drodze doświadczalnej. Modelowanie zjawiska ewapotranspiracji, erozji glebowej i przyrostu całkowitego biomasy to przykłady modeli fenomenologicznych. Modele takie muszą być wykalibrowane dla danego miejsca i przeniesienie ich do innych warunków wymaga zazwyczaj ponownej kalibracji.

Modele matematyczno-fizyczne zostaną przedstawione na bazie rozwiązania kilku problemów charakterystycznych dla materiałów rolniczych. Przy konstruowaniu modeli matematyczno-fizycznych występują dwa etapy:

1. Określenie wszystkich możliwych czynników wpływających na modelowany proces i wyrażenie tego wpływu za pomocą równań, najlepiej konstytutywnych.
2. Eliminacje czynników (elementów) modelu w celu jego uproszczenia do praktycznego korzystania z zachowaniem wymaganej dokładności opisu procesu rzeczywistego.

Jako pierwszy zostanie przedstawiony przykład modelowania ruchu wody w ciele kapilarno-porowatym z członem źródłowym. Porównując równanie ciągłości wyrażające zasadę zachowania masy dla pola ze źródłami:

Jako pierwszy zostanie przedstawiony przykład modelowania ruchu wody w ciele kapilarno-porowatym z członem źródłowym. Porównując równanie ciągłości wyrażające zasadę zachowania masy dla pola ze źródłami:

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right) + \nabla\bar{q} = f(\bar{r}, t) \quad (1)$$

z równaniem Darcy, będącym klasycznym równaniem transportu:

$$\bar{q} = K(\theta) \text{grad } \Psi \quad (2)$$

otrzymujemy równanie Richardsa z członem źródłowym:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\nabla K(\Theta) \text{grad } \Psi + f(\bar{r}, t) \quad (3)$$

gdzie: q - strumień wody (m s^{-1}), $K(\Theta)$ - współczynnik przewodnictwa wodnego w strefie nienasyconej (m s^{-1}), Θ - wilgotność ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Ψ - potencjał wody glebowej (J m^{-3}), $f(r, t)$ - funkcja źródłowa (np. pobór wody przez korzenie roślin, nawadniająco-odwadniająca systemy drenażowe).

Funkcja źródłowa $f(r, t)$ opisuje ilość wody wpływającej lub wypływającej z wybranej objętości innymi mechanizmami niż to opisuje równanie Richardsa. W glebie dodatnimi źródłami wody są np. systemy drenarskie, natomiast system korzeniowy roślin jest ujemnym źródłem wody. Wartość funkcji źródłowej zależy od położenia i czasu. Zmienność ta zależy od stopnia rozwoju fenomenologicznego roślin, warunków glebowych i klimatycznych. Jest to bardzo ważny problem do rozwiązania dla fizyków i fizjologów roślin.

Innym problemem, który leży w obrębie zainteresowań agrofizyki jest opis równoczesnego transportu wody, ciepła i soli w profilu glebowym. W termodynamice procesy równoczesnego transportu różnych form materii i ich interakcji opisuje prawo Onsagera:

$$J_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k \quad (4)$$

które mówi, że strumienie termodynamiczne J_i są jednorodnymi, liniowymi funkcjami termodynamicznych sił X_k . Współczynniki L_{ik} , które w ogólności zależne są od temperatury, zawartości wody, koncentracji soli i innych, są nazywane współczynnikami kinetycznymi. W praktyce prawo to upraszcza się [2,10]. Przykładowy układ równań opisujących ruch wody, ciepła i soli składa się z trzech

równań opisujących strumienie wywołane gradientami potencjału wody glebowej, temperatury, koncentracji soli oraz gradientem potencjału grawitacyjnego:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot ((D_{\theta l} + D_{\theta v}) \nabla \theta) - \nabla \cdot ((D_{Tv}) \nabla T) - \nabla K \quad (5)$$

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) - L \nabla (D_{\theta v} \nabla \theta) \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla (D \nabla C) - \nabla (vC) \quad (7)$$

gdzie: c_v pojemność cieplna ($J m^{-3} ^\circ C^{-1}$); T - temperatura ($^\circ C$); t - czas (s); λ - współczynnik przewodnictwa temperaturowego ($W m^{-1} ^\circ C^{-1}$); L - ciepło przejścia fazowego ($J m^{-3}$); θ - wilgotność objętościowa ($m^3 m^{-3}$); $D_{\theta v}$ - współczynnik dyfuzji pary w warunkach izotermicznych ($m^2 s^{-1}$); $D_{\theta l}$ - współczynnik dyfuzji cieczy w warunkach izotermicznych ($m^2 s^{-1}$); D_{Tv} - współczynnik dyfuzji pary w warunkach nieizotermicznych ($m^2 s^{-1}$); D_{Tl} - współczynnik dyfuzji cieczy w warunkach nieizotermicznych ($m^2 s^{-1}$); C - koncentracja soli ($m^3 m^{-3}$); D - współczynnik dyfuzji hydrodynamicznej - ($m^2 s^{-1}$);

Należy podkreślić, że strumień wody jest rozdzielony na strumienie w postaci pary i w postaci cieczy. Jest to bardzo ważne, ponieważ woda w postaci cieczy transportuje sole, natomiast w postaci pary transportuje energię przejścia fazowego. Równanie opisujące ruch ciepła posiada dwa człony, człon dyfuzyjny oraz człon związany ze strumieniem wody w postaci pary. Równanie opisujące ruch soli zawiera dwa człony, człon dyfuzyjny oraz człon związany z transportem soli poprzez strumień wody w postaci cieczy. Taki system opisujący kształtowanie się warunków wzrostu i rozwoju roślin wymaga jednakże eksperymentalnego wyznaczenia współczynników transportu.

Jednym z ważniejszych problemów jest opis ruchu wody w glebie jako ośrodka heterogenicznym. Zostanie on zaprezentowany na przykładzie modelu przepływu preferencyjnego opracowanego w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie.

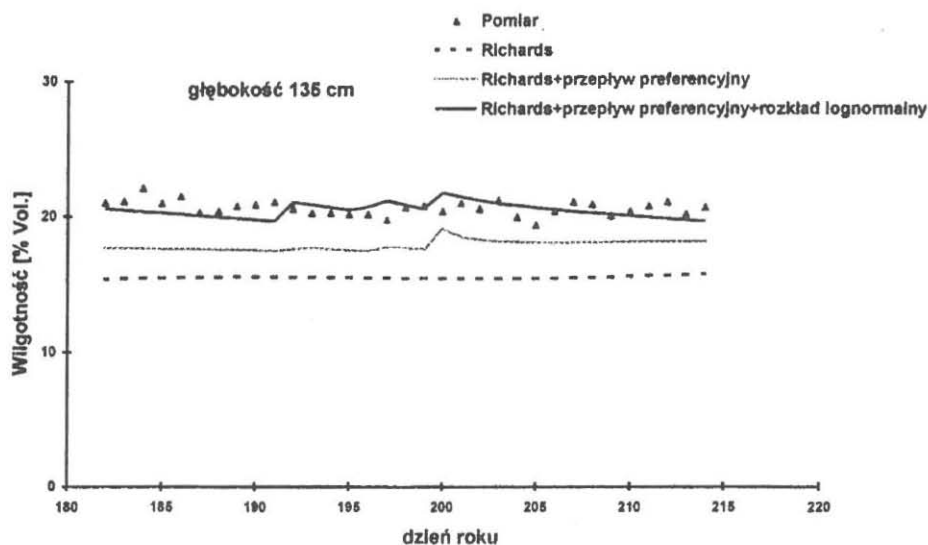
Większość modeli opisujących transport wody w ośrodku kapilarnoporowatym jakim jest gleba, zakłada ich homogeniczność w całości, lub homogeniczność poszczególnych warstw. Takie założenie bardzo upraszcza model, ograniczając go do jednego wymiaru, co zasadniczo upraszcza obliczenia. Istnieje jednak sytuacja gdy uwzględnienie heterogeniczności jest konieczne ze względu na dokładność modelu.

W glebie występują makropory, tzn. pory w których zachodzi niekapilarny przepływ wody o bardzo zróżnicowanej, w porównaniu z otoczeniem, przewodności wodnej. Stanowią one zaburzenie jednorodności ośrodka, której nie wolno pominąć w modelowaniu. Niejednorodność stanowić może lokalna zmiana przewodności wodnej, prowadząca czasami do zmienności właściwości hydrofilowych lub hydrofobowych. Makropory w glebie powstają jako efekt aktywności fauny glebowej, w wyniku obumierania korzeni roślin lub jako efekt procesu kurczenia i pęcznienia gleby.

W Instytucie Agrofizyki PAN w ramach projektu Unii Europejskiej opracowano model przepływu preferencyjnego (bypass flow, ang.) jako submodel do istniejącego i użytkowanego jednowymiarowego modelu hydrologicznego, opartego o numeryczne rozwiązanie równania Richardsa i stanowiącego submodel modelu plonów dla różnych scenariuszy zmian klimatu w Europie [3,12,13,17,18]. Model został tak skonstruowany, by nie zmieniając struktury istniejącego, był stosowany opcyjnie. Prezentowany proces tworzenia modelu i kolejnego jego ulepszania aż do osiągnięcia zadowalającej dokładności, jest dobrą ilustracją cyklu badawczego w fizyce, tzn. kolejnych przybliżeń, aż do osiągnięcia modelu najbliższego badanemu procesowi. Na początku określono wielkość i kształt makroporów pochodzenia biologicznego poprzez analizę obrazów przekroju, a także stworzono submodel opisujący zmiany rozmiarów makroporów pochodzenia fizycznego, tzn. pęcznienia i kurczenia w wyniku zmian wilgotności. Opracowano model napelniania wodą makroporów i poziomej jej infiltracji do warstw profilu zgodnie z przybliżeniem Greena-Ampta. Założono, że woda do makroporów trafia bezpośrednio z opadu i w wyniku spływu powierzchniowego, gdy intensywność opadu przekroczy zdolności do infiltracji.

Pierwotny model oparty o równanie Richardsa był uzupełniony modelem przepływu preferencyjnego w ten sposób, że po kroku czasowym obliczeń wg procedury Richardsa proces ten był zatrzymywany i uruchamiała się procedura "bypass flow". Ilość wody była wyliczana dla kroku czasowego obliczeń procedury Richardsa i w momencie jego zatrzymania woda była rozprowadzana w profilu glebowym zgodnie z procedurą Greena-Ampta, modyfikując profil wilgotności. Ten nowy rozkład wilgotności w profilu glebowym stawał się aktualny dla kolejnego kroku obliczeń według procedury Richardsa.

Wyniki pokazane na Rys. 1 wskazują, że obliczone dla warstwy 135 cm wartości wilgotności wg modelu Richardsa dają bardziej niedoszacowane wartości niż wyliczane w modelu z dołączoną procedurą bypass flow. Jednakże i tutaj rozbieżności były zbyt duże. Założono, że przyczyną niedoszacowania było wprowadzenie



Rys. 1. Zmierzone i wyliczone przy pomocy modelu wartości wilgotności
Fig. 1. Measured and calculated values of water content

do modelu intensywności opadu jako średniej wielkości w ciągu 24 godzin. W rzeczywistości opad trwa określony czas, a jego intensywność jest dużo większa od średniej dobowej i charakterystyczna dla pory roku i miejsca. Wstawienie do modelu zbliżonych wartości intensywności opadów aproksymowanych rozkładem log-normalnym [16], spowodowało wystąpienie zwiększonego spływu powierzchniowego i w konsekwencji większą ilość wody wpływającej do makoporów. Spowodowało to wzrost wilgotności w badanych warstwach w taki sposób, że zgodność modelu z wynikami ekperymentalnymi była zadawalająca.

Ważnym problemem agrofizyki jest określenie i opisanie właściwości mechanicznych materiałów rolniczych. Mechanika ciał zdyspergowanych jest bardzo rozwinięta i z powodzeniem stosowana w inżynierii lądowej. Jednakże metod tam stosowanych nie można przenieść do rozwiązywania większości problemów w agrofizyce, bowiem inżynieria lądowa bada przypadki ośrodków maksymalnie zagęszczonych, a przyłożone naprężenia są stałe w czasie.

W agrofizyce w przeważającej większości przypadków mamy do czynienia z obiektami rozluźnionymi, np. gleba, materiały ziarniste, a siły oddziałujące są zwykle dynamiczne, np. oddziaływanie kół pojazdów i maszyn, elementów aktywnych maszyn, itp. W tych przypadkach zachodzą odkształcenia postaciowe i objętościowe, wielkości decydujące o zmianie struktury odkształcanych ciał. W glebie końcowy stan decyduje o kształtowaniu się stosunków powietrzno-wodnych i cieplnych, a efekty

odkształceń zależą od wielkości naprężeń, czasu ich działania oraz prędkości odkształcenia. Relacja naprężenie-odkształcenie jest warunkowana bardzo silnie przez wilgotność badanych ciał zdyspergowanych [14].

W agrofizyce do opisu odkształceń pod wpływem różnie oddziałujących naprężeń używa się tzw. modeli reologicznych zbudowanych, np. z elementów sprężystości i lepkości [5,11]. Modele te mogą mieć realizację analogową, tzn. różne systemy połączeń sprężyn i tłoczków z lepką cieczą oraz matematyczną, gdzie występują pochodne naprężeń i odkształceń opisujących wpływ zależności tych wielkości od czasu. Sprężystość stanowi część odkształceń działających natychmiastowo i odwracalnie, natomiast lepkościowa część odkształceń zależy od czasu i jest nieodwracalna. Znajomość parametrów równań reologicznych dla badanych obiektów, np. gleby, pozwala na dobór mechanicznych oddziaływań przy danej wilgotności, aby uzyskać zamierzone odkształcenia i aby one nie przekroczyły progu prowadzącego do fizycznej degradacji gleby.

MONITORING

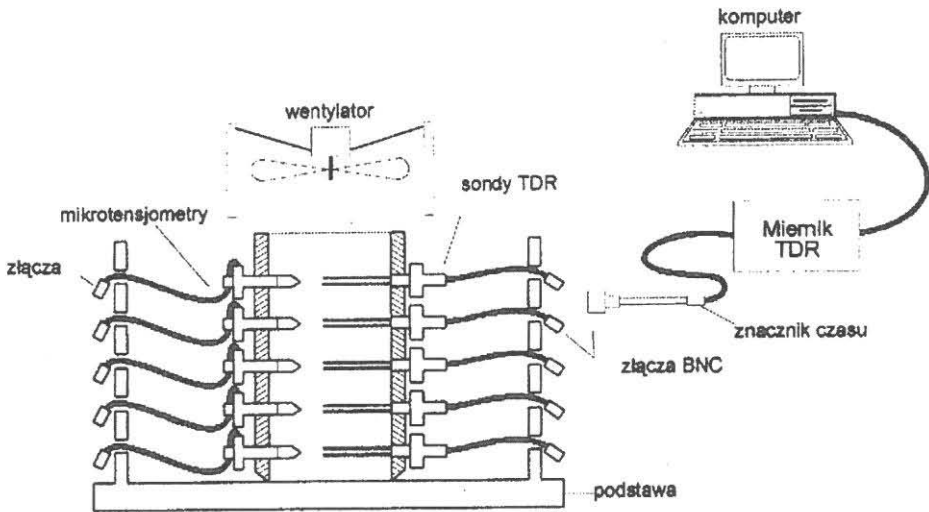
Obok modelowania w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie rozwijany jest intensywnie monitoring jako druga podstawowa metoda badawcza stosowana w naukach przyrodniczych, w tym w agrofizyce. Systemy pomiarowe i monitoring są podstawowymi narzędziami poznania świata materialnego. Wiedza o zmienności wielkości fizycznych jest podstawą do formułowania praw rządzących przyrodą oraz budowania i weryfikacji modeli opisujących przyrodę. Specjalne systemy pomiarowe są niezbędne do wyznaczania parametrów fizycznych, tzn. współczynników transportu jako elementów fizyczno-matematycznych modeli.

W Instytucie Agrofizyki PAN jednym z głównych kierunków badań jest metrologia agrofizyczna. Opracowano w nim patenty na 57 wynalazków, w większości wdrożonych. Osiągnięcia w tej dziedzinie to, m.in. opracowany i produkowany na licencji system pomiaru wilgotności, potencjału wody glebowej, zasolenia oraz temperatury w warunkach laboratoryjnych i polowych oraz zastosowanie i interpretacja obrazów termalnych w badaniach rolniczych w skali laboratoryjnej, polowej oraz zdjęć lotniczych i satelitarnych.

Pomiar wilgotności metodą reflektometrii czasowej TDR (Time Domain Reflectometry, ang.) polega na pomiarze prędkości rozchodzenia się impulsu elektromagnetycznego w badanym ośrodku [6]. Prędkość ta zależy od stałej dielektrycznej ośrodka, a stała dielektryczna jest warunkowana zawartością wody, której stała dielektryczna ma najwyższą wartość ze wszystkich ciał (około 81). Zasada

pomiaru jest prosta, jednakże realizacja techniczna wymaga zastosowania najnowszych technik wysokich częstotliwości, ponieważ wyznaczane prędkości są rzędu prędkości światła. Generowany szpilkowy impuls przesyłany jest kablem koncentrycznym do sondy składającej się z dwóch równoległych niez izolowanych drutów, o długości około 10 cm w wersji polowej i około 5 cm w wersji laboratoryjnej, a odległość między nimi wynosi odpowiednio 1 cm i 0,5 cm. Sfera czułości takiej sondy jest walcem o wysokości równej długości prętów i średnicy równej potrójnej odległości między drutami. Impuls wędrując w kablu, a następnie wzdłuż falowodu ulega odbiciom na wszystkich nieciągłościach impedancji, tzn. częściowo odbija się na przejściu kabel – sonda i prawie całkowicie odbija się od końca sondy. Mierzony czas między odbitymi impulsami na przejściu kabel – sonda i od końca sondy to czas dwukrotnego przejścia impulsu wzdłuż sondy. Zmierzony czas pozwala wyliczyć prędkość, a tym samym stałą dielektryczną ośrodka. Sonda taka może być stosowana do pomiaru wilgotności w różnorodnych ciałach kapilarno-koloidalno-porowatych oraz w ciałach o budowie komórkowej i tkankowej co pozwala na szerokie zastosowanie tego systemu w badaniach rolniczych. Różne ciała posiadają różne zależności: stała dielektryczna – wilgotność i dla każdego ciała taka charakterystyka powinna być wyznaczona. Jednakże dla ciał o zbliżonej budowie charakterystyki te niewiele się różnią. I tak, np. dla wszystkich gleb mineralnych można stosować jedną charakterystykę, co pozwala mierzyć wilgotność z błędem bezwzględnym 2%. Ponieważ druty sondy mają galwaniczny kontakt z ośrodkiem, wykorzystuje się je do pomiaru elektrycznego przewodnictwa objętościowego, które jest miarą tzw. zasolenia gleby. Zainstalowane w korpusie sondy termopara służy do pomiaru temperatury. Wersja polowa aparatu umożliwia instalację sond o długości korpusu warunkowanej głębokością zainstalowania i umożliwia pomiar prowadzony przez operatora lub automatyczny data-logger i multiplexer. Długość sondy z kablem do multiplexera, ze względu na tłumienie impulsów wysokiej częstotliwości, nie powinna przekraczać 6 m. Opracowane systemy monitorowania wyposażone są w komputer i 20 szeregowo połączonych data-loggerów z multiplexerami. Odległość między poszczególnymi data-loggerami może wynosić do 1 km, ponieważ między nimi przesyłany jest przetworzony sygnał.

Pomiar potencjału wody w szerokiej gamie materiałów rolniczych jest realizowany metodą psychrometryczną. Wykorzystywany jest psychrometr marki Wescor, w którym schładzanie termometru mokrego uzyskiwane jest poprzez zastosowanie efektu Peltiera. Ponieważ często pomiar wykonywany jest punktowo, ważną zaletą tego rozwiązania technicznego jest wymiar psychrometru



Rys. 2. Laboratoryjny zestaw TDR

Fig. 2. Laboratory setup of TDR-device

mniejszy od 5 mm. Zaletą metody psychrometrycznej jest możliwość pomiaru potencjału wody *in situ*, ponieważ pomiar zachodzi w fazie gazowej poprzez wyznaczanie względnej prężności pary wodnej w danych warunkach.

Wersja laboratoryjna systemu monitorowania (Rys. 2) umożliwia pomiar wilgotności, potencjału wody, zasolenia i temperatury w kolumnie glebowej. Pozwala ona na uzyskanie danych o zmienności tych wielkości dla wybranych poziomów. Interpretacja zebranych danych o zmienności czasowo-przestrzennej tych wielkości, przy zastosowaniu metody profili chwilowych, umożliwia wyznaczenie współczynników transportu, np. wody, z jednoczesnym wyznaczeniem krzywej retencji w warunkach izotermicznych i nieizotermicznych [7].

Systemy monitorowania, opracowane w Instytucie Agrofizyki, są stosowane w wielu krajach i w bardzo zróżnicowanych warunkach klimatycznych od lasów Amazonii po pustynie w Izraelu. Monitorujący system, oparty na prezentowanym przykładzie, został opracowany do badań termoizolacyjnych właściwości materiałów budowlanych w ramach 5 ramowego projektu Unii Europejskiej i jest stosowany w budownictwie i renowacji zabytków.

Jedną z podstawowych metod określania fizycznego stanu obiektów jest ich obraz w zakresie światła widzialnego. Rozszerzeniem informacji na temat obiektów i zachodzących w nich procesach jest ich obraz w zakresie podczerwieni. W naukach rolniczych informacja w podczerwieni jest również wykorzystywana do

badania dużych obszarów z pułapu lotniczego i sateliteranego w zakresie długości fal 300-500 nm i 800-1300 nm odpowiadających oknom, gdzie fale nie są silnie pochłaniane przez atmosferę [4].

W Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie do badań laboratoryjnych i pólowych stosowane są kamery termowizyjne AGEMA. Techniczna jakość zobrazowań termalnych, w tym zdjęć lotniczych i satelitarnych, jest bardzo wysoka, problemem jest jednak poprawna fizyczna interpretacja tych zobrazowań. Prowadzone badania w skali laboratoryjnej i mikropoletkowej-lizymetrycznej miały na celu określenie, jakie informacje o zasobach wodnych można uzyskać z termalnych zobrazowań lotniczych i satelitarnych użytków zielonych. Było to zadanie zlecone przez FAO. Rodzaj pokrywy roślinnej podyktowany był strukturą agrarną w Polsce, gdzie jedynie użytki zielone w dolinach zajmują duże obszary. W badaniach laboratoryjnych w szklarni wykonywano pomiary dla 6 wazonów umieszczonych na jednym planie zdjęciowym, czyli w identycznych warunkach zewnętrznych, w których gleba była w różnym stanie uwilgotnienia, a co za tym idzie o różnym potencjale wody glebowej. Pomiary wykonywano dla 2 gleb (organicznej i mineralnej), pobranych do wazonów z nienaruszoną strukturą z naturalną roślinną pokrywą łąkową. Pomiary wykonano również dla identycznych gleb i roślin dla nienaruszonych profili w lizymetrach o wysokości 1 m i średnicy 50 cm, gdzie dokonywano badań porównawczych z lizymetrów z komfortowymi warunkami wodnymi. Jednoznacznie stwierdzono, że podwyższenie temperatury radiacyjnej pokrywy roślinnej, w stosunku do roślin znajdujących się w komfortowych warunkach wodnych, następowało dla obu gleb przy różnych wartościach wilgotności (dla gleby mineralnej około 10-15 %, a dla gleby organicznej około 40-45 %). Wilgotności w tych zakresach odpowiadały punktowi trwałego więdnięcia roślin na krzywej retencji wodnej, a zatem około 15 barów. Zależności różnice temperatur – potencjał wody dla obu gleb pokrywały się. Badania te dały jednoznaczną odpowiedź, że temperatura radiacyjna roślin daje informację o dostępności wody dla roślin, a zatem informacja ta może być wykorzystywana do zarządzania zasobami wodnymi w wielkoobszarowych systemach irygacyjnych. Ilość zmagazynowanej wody może być określona tylko dla wartości potencjału wody glebowej odpowiadającej zahamowaniu wzrostu i rozwoju roślin [9]. Informacje o zasobach wodnych można uzyskać dla gleby bez pokrywy roślinnej, gdzie ilość zmagazynowanej wody można szacować na podstawie inercji cieplnej gleby, która warunkowana jest jej wilgotnością. Obraz termalny może być wykorzystywany również w przypadkach, gdy procesy fizjologiczne są warunkowane, np. chorobami, genotypowym zróżnicowaniem procesów fotosyntezy, warunkami

zewnątrznymi decydującymi o procesach fizjologicznych czyli wszędzie tam gdzie czynnik odwierciedla się zmianami temperatury radiacyjnej. Przykładem takim mogą być badania zróżnicowanych efektów energetycznych w czasie nawilżania nasion fasoli podczas których stwierdzono, że temperatura radiacyjna nasion jest silnie skorelowana z określoną później zdolnością ich kiełkowania. Temperatura radiacyjna może być również wykorzystywana jako wskaźnik ewapotranspiracji aktualnej [1]. Zaletą badań termowizyjnych jest nieinwazyjność oraz to, że sama roślina jest wskaźnikiem dającym informacje o jej stanie fizjologicznym. Technika obrazowań termalnych wykorzystywana jest w kooperacji z Wojskowym Instytutem Techniki i Uzbrojenia do wykrywania min podziemnych i innych obiektów, stanowiących lokalne zaburzenie właściwości termalnych w profilu glebowym.

WNIOSKI

Podane przykłady dotyczące modelowania i monitoringu miały na celu wykazanie, że te dwie metody badawcze mają charakter uniwersalny, tzn. dotyczą wszystkich dyscyplin mieszczących się w zakresie nauk przyrodniczych stanowiąc nowoczesny i skuteczny warsztat badawczy. Należy również podkreślić, że obie te metody wzajemnie się uzupełniają.

Modele umożliwiają symulację procesów i przewidywanie zachowania się procesów i obiektów w przyszłości, prowadzenie eksperymentów myślowych i abstrakcyjnych realizowanych numerycznie, zamiast długich, żmudnych i kosztownych badań eksperymentalnych. Monitoring natomiast daje informacje historyczne o systemach, o ich aktualnym stanie, a dane aktualne wstawiane do modeli predykcyjnych zwiększają ich zdolność przewidywania.

PIŚMIENNICTWO

1. **Baranowski P.:** Modelowe badania wykorzystania pomiaru temperatury radiacyjnej roślin do oceny ewapotranspiracji aktualnej. Praca doktorska. Institute of Agrophysics, Lublin, 1999.
2. **Chung Sang-Ok., Horton R.:** Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Res. Res.*, 23, (12), 2175-2186, 1987.
3. Euro-ACCESS (Agroclimatic Change and European Soil Sustainability) (Ed.: Loveland P.J., Rounsevell M.D.A.). ISBN 1-871651-17-4, Cranfield University, UK, 1996.
4. **Kędziora A.:** Podstawy Agrometeorologii, PWRiL, Poznań, 1995.
5. **Konstankiewicz K., Pukos A.:** Hamans inspiration concerning new mechanics of three-phase media. *Int. Agrophysics*, 7, 3-14, 1993.
6. **Malicki M.A., Skierucha W.:** A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300ps rise-time needle pulse. *Irrig. Sci.*, 10, 153, 1989.

7. **Malicki M.A., Plagge R., Renger M., Walczak R.T.:** Application of time-domain reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores. *Irrig. Sci.*, 13, 65-72, 1992.
8. **Malicki M., Walczak R.T.:** A gauge of the redox potential and the oxygen diffusion rate in the soil with an automatic regulation of cathode potential. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 220, II, 1983.
9. **Mazurek W.:** Temperatura radiacyjna jako wskaźnik stresu wodnego roślin. Praca doktorska. Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1998.
10. **Philip J.R., De Vries D.A.:** Moisture movement in porous materials under temperature gradient. *Eos Trans. AGU*, 38, 222-232, 1957.
11. **Pukos A., Walczak R.T.:** Podstawy teoretyczne badania właściwości mechanicznych gleb. *Problemy Agrofizyki*, 7, 1973.
12. **Ślawiński C.:** Modelowe badania preferencyjnego przepływu wody w ośrodku glebowym. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1997.
13. **Ślawiński C., Sobczuk H., Walczak R.T.:** Submodel of bypass flow in cracking soils - part 1. *Theory. Int. Agrophysics*, 10(3), 189-195, 1996
14. **Walczak R.T.:** Model investigation of water binding energy in soils of different compaction. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 197, 11-43, 1977.
15. **Walczak R.T.:** Modelowe badania zależności retencji wodnej od parametrów fazy stałej gleby. *Probl. Agrofizyki*, 41, 1984.
16. **Walczak R.T., Ślawiński C., Kaszewski B.:** The method of rainfall intensity estimation for runoff prediction. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 419, 119-123, 1995.
17. **Walczak R.T., Ślawiński C., Sobczuk H., Gliński J.:** Modelling soil crack development in EURO-ACCESS II. 1. Technical Report (Chapter 5) ISBN 1-871651-17-4, 1996.
18. **Walczak R.T., Sobczuk H., Ślawiński C.:** Submodel of bypass flow in cracking soils - part 2. Experimental validation. *Int. Agrophysics*, 10(3), 197-207, 1996.
19. **Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M.:** Feynmana wykłady z fizyki. Tom 1.1, Mechanika. Szczególna teoria względności. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.

MODELLING AND MONITORING IN AGRICULTURAL SCIENCES

R.T. Walczak, C. Ślawiński

Institute of Agrophysics PAS, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

S u m m a r y. This paper presents the examples of model investigations and the systems of natural environment monitoring applied in the agrophysical studies. The aim of giving these examples was to show that modelling and monitoring are universal, i.e., they refer to all the disciplines being a part of natural sciences and they constitute a modern and effective research working methods. It should be also stressed that both methods are complementary to each other.

K e y w o r d s: modelling, monitoring, agricultural sciences.